doi:10.13866/j.azr.2019.01.07

1957—2015 年叶尔羌河流域气候变化特征及其径流响应①

张雪琪[1]， 满苏尔·沙比提[1]， 刘海涛[2]， 马国飞[1]
(1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院,新疆 乌鲁木齐 830054; 2. 新疆维吾尔自治区气象局,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要: 根据流域内气象、水文站点的长期观测数据,利用线性趋势、相关系数、累积距平、Mann-kendall(M-K)突变检验等方法分析不同区域的干、湿季气候变化特征,并假定不同的气候情景组合,分析径流对气候变化的响应程度。结果表明:① 1957—2015 年 4 个单元气温和降水量呈增加趋势;除上游外,相对湿度、平均风速和大风日数呈减小趋势,流域径流量呈增加趋势。② 气温在 1996 年发生突变;降水量未出现明显突变点;相对湿度在 2005 年左右发生突变;除下游外,平均风速在 1983 年发生突变;径流量于 1993 年发生突变,突变后径流量增加了 9.08×10^{8} m^{3}。③ 相关性分析显示,流域径流量与湿季平均气温、平均最低(最高)气温呈极显著正相关,与湿季平均风速、大风日数和相对湿度呈负相关,除上游径流与干季降水量呈正相关外,其他区域与降水量呈负相关。④ 敏感性分析表明,当降水量不变,气温升高 1 ℃,径流量增加 9.06%;当气温不变,降水量增加 10%,径流量减小 1.67%,这主要与径流组成有关。流域 77.4% 的径流量来自雪冰融水补给,当降水量增加时,气温降低,减少了冰川积雪的融化,因而流域径流与气温呈正相关,与降水量呈负相关,且对气温变化更敏感。

关键词: 气候变化; 气温; 降水量; 径流量; 敏感性; 叶尔羌河流域

IPCC 第 4 次评估报告(AR4)提出[1],近 50 a 全球平均气温的线性增温速率为 0.13 ℃·$(10a)^{-1}$。我国同期增温速率为 0.25 ℃·$(10a)^{-1}$[2],新疆增温率高达 0.37 ℃·$(10a)^{-1}$[3],全国和全疆的气温变化趋势与全球一致,呈现增温趋势,且增温幅度远高于全球。气候变化势必影响水循环、加快"固体水库"的消融和萎缩、加大极端水文事件的发生[4-5]。AR5 明确指出[6],全球山地冰川总体呈现持续退缩状态,以近 20 a 尤为显著。气候变化及其对水资源的影响已成为一个备受关注的热点课题[7-8]。

西北干旱区绝大多数河流发源于山区,对气候变化十分敏感[3-4]。已有诸多学者[9-14]开展了径流与气候变化之间的相关研究,认为不同区域水资源对气候变化的响应具有显著性差异。叶尔羌河流域北受南天山、南受喀喇昆仑山、西受帕米尔高原、东受塔克拉玛干沙漠的影响,水资源极度短缺,常年降水量不足 70 mm,因此,有必要开展径流量对气候变化的响应研究。以往研究[15-18]多集中于流域整体或河源区的气温、降水对径流量的影响,而从不同子区域的角度去研究径流对气候变化响应的相对较少。因选取时段、方法的不同,研究结果也略有差异。考虑到气象、水文数据的时序更新,有必要开展叶尔羌河流域径流量对气候变化的响应研究。基于此,本文利用流域内代表性气象、水文站点 1957—2015 年数据,通过线性趋势法、累积距平法、M-K 突变检验法分析上、中、下游气候、径流变化特征,并利用敏感性分析定量讨论径流量对气候变化的响应程度,以揭示流域气候变化与径流之间的关系,亦为今后相关研究提供参考。

1 研究区概况

叶尔羌河流域(74°28′~80°54′E,34°50′~40°31′N)位于塔克拉玛干沙漠西缘(图 1),北抵天山南坡,与阿克苏地区相接,流域内部大致分为山区和平原 2 大气候区。其中山区内拥有现代冰川 3 059 条,冰川总面积 5 315 km^{2},总储量达 684.4

① 收稿日期: 2018-03-12; 修订日期: 2018-08-03
基金项目: 国家自然科学基金项目(41661100)资助
作者简介: 张雪琪(1994-),女,硕士研究生,主要从事干旱区绿洲环境演变的相关研究. E-mail:zxqforever940105@163.com
通讯作者: 满苏尔·沙比提. E-mail:mansursa@163.com

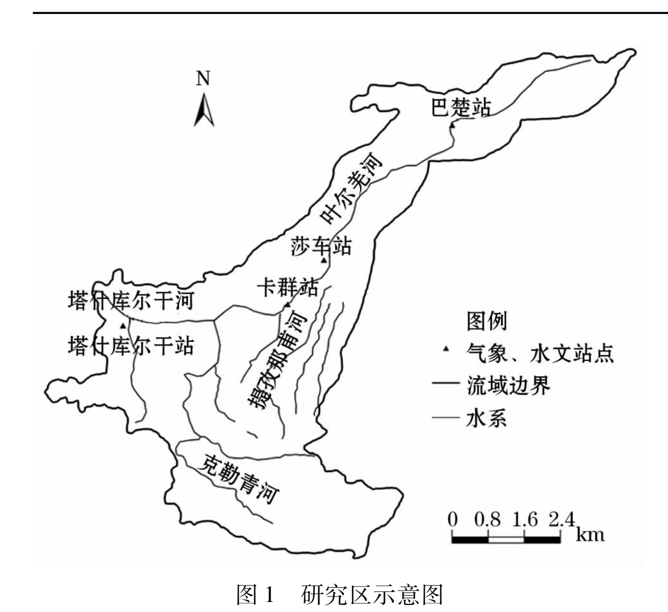


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch map of the study area

km^3，年冰川融水量约 38.24 × 10^8 m^3[16,18]；平原区面积约占流域总面积的 38.5%，承载着流域约 98.24% 的人口[15,19]。叶尔羌河发源于喀喇昆仑山北坡，全长1 097 km，属于典型的雪冰补给型河流，据出山口卡群站观测资料显示，流域 77.4% 的径流量来自高山雪冰融水补给[11,16]，出山后，流经喀什地区叶城县、泽普县、莎车县、麦盖提县、巴楚县，与和田河在阿克苏境内汇合注入塔里木河。

2 数据及方法

2.1 数据来源

选取塔什库尔干站(75°14′E，37°46′N，3 090.1 m)、莎车站(77°16′E，38°26′N，1 231.2 m)、巴楚站(78°34′E，39°48′N，1 116.5 m)和卡群站(76°54′E，37°59′N，1 450.0 m)1957—2015 年平均气温、平均最低(最高)气温、降水量、相对湿度、平均风速、大风日数和径流量数据，经极值检验、时间一致性检验、人工抽查均无误。上述资料来源于中国气象数据网和新疆维吾尔自治区气象局。

2.2 处理方法

按照 WMO 规定，标准气候平均值采用气候要素最近 3 个整年代(1981—2010 年)的平均值作为该要素的多年气候平均值。时间尺度上：由于流域 77.4% 的径流量由雪冰融水补给[16]，水资源年内分配极不均匀，4—10 月来水量约占全年的 85.8%，故按照 4—10 月为湿季、11 月至翌年 3 月为干季生成逐季气候资料序列[9]。空间尺度上：用塔什库尔干站、莎车站、巴楚站的气象数据代表上、中、下游 3 个子区域的气候变化特征，用 3 个站点气象数据的平均值代表全流域的气候变化特征值。本文样本数 $n = 59$，自由度 $df = n - 2 = 57$，查询相关系数检验临界值表，得到 $r_{0.05} = 0.26$，$r_{0.01} = 0.33$。

累积距平法[20]可以直观反映要素的阶段性变化特征，并且对要素突变点的确定具有较强的指示作用[10]。首先通过确定要素的多年均值，然后逐年计算距平值，最后按年序累加得到累积距平序列。以降水量为例，计算过程如下：

$$LP_i = \sum_{i=1}^{n} (P_i - \bar{P}) \tag{1}$$

式中：LP_i 为第 i 年降水量的累积距平值；P_i 为第 i 年降水量的实测值；$\bar{P}$ 为多年平均降水量。

根据降水量和径流量的距平百分率依次划分为多雨期、少雨期和丰水期、枯水期。

$$\Delta P = \frac{P - \bar{P}}{P} \times 100\% \tag{2}$$

式中：P 为实测期降水量；$\bar{P}$ 为多年平均降水量，若 $\Delta P \geq 25\%$，则为多雨期；若 $\Delta P \leq -25\%$，则为少雨期[18]。

$$\Delta R = \frac{R - \bar{R}}{\bar{R}} \times 100\% \tag{3}$$

式中：R 为实测期径流量，$\bar{R}$ 为多年平均径流量，若 $\Delta R \geq 20\%$，则为丰水期；若 $\Delta R \leq -20\%$，则为枯水期[18]。

3 结果与分析

3.1 气候变化特征

3.1.1 趋势分析

(1) 气温：叶尔羌河流域近 60 a 平均气温为 9.38 ℃，上、中、下游平均气温分别为 3.74、12.01、12.40 ℃。4 个单元(全流域和上中下游)多年平均最低气温 -3.29 ~ 5.89 ℃、多年平均最高气温 11.03 ~ 19.73 ℃、平均极端最低气温 -28.63 ~ -15.72 ℃、平均极端最高气温 29.13 ~ 39.22 ℃。从图 2 可以看出，4 个单元近 60 a 年均气温变化呈增加趋势，变化倾向率 0.24 ~ 0.29 ℃·(10a)$^{-1}$，其中上游区域增温幅度最大，4 个单元增温趋势均通过 99% 置信度检验(表 1)。干、湿季平均气温变化特征(图略)与年变化基本一致，表现出增加趋势。干季平均气温上升速度高于全年，介于 0.29 ~

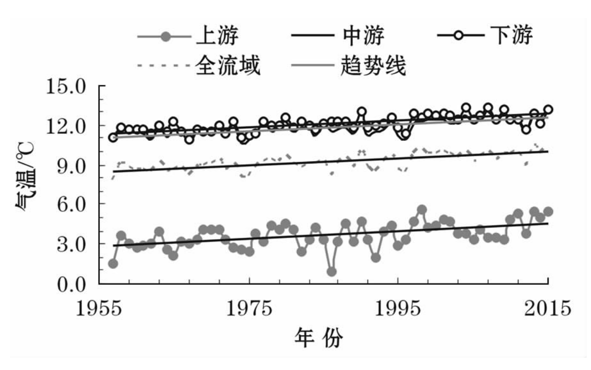


图 2 年平均气温变化

Fig. 2 The change of annual average temperature

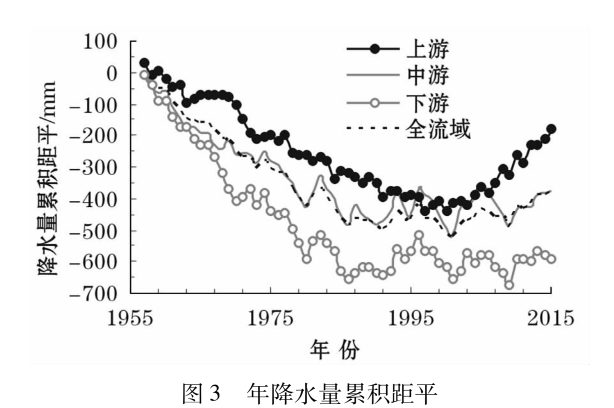


图 3 年降水量累积距平

Fig. 3 The accumulative anomaly of annual precipitation

0.38 ℃·(10a)$^{-1}$,近 60 a 上升了 1.41 ~ 2.29 ℃。湿季平均气温增幅低于全年,近 60 a 增加了 1.13 ~ 1.26 ℃,上升速度为每 0.20 ~ 0.23 ℃·(10a)$^{-1}$。通过相关系数检验,干湿季平均气温增幅均通过 99% 置信度检验(表 1)。研究时段内,除中游地区极端最高气温呈略微降低外,其他区域平均最高(最低)气温、极端最高(最低)气温均呈上升趋势,其中极端最低气温的上升幅度最大,为 0.33 ~ 0.54 ℃·(10a)$^{-1}$。干、湿季变化规律与年变化基本一致,极端最低气温、平均最低气温的增幅高于极端最高气温、平均最高气温。

(2) 降水量:近 60 a 叶尔羌河流域及其上、中、下游多年平均降水量分别为 69.55、79.28、61.27、68.10 mm。图 3 显示,20 世纪 50 年代末至 90 年代初 4 个单元降水量累积距平值呈减小趋势,而后上游区域表现出明显的增长态势,其他区域处于不断波动中,这表明自 90 年代起上游区域降水量增加趋势较其他区域更明显。结合公式(2)发现,从 60 年代到 90 年代再到 21 世纪初,4 个单元少雨期的次数从 3 ~ 8 次减少到 3 ~ 6 次再到 1 ~ 5 次;同期多雨期的次数从 0 ~ 1 次增加到 0 ~ 3 次再到 4 ~

表 1 气候要素变化特征

Tab. 1 Variation of climate factors

气象要素	区域	年		干季		湿季	
		变化率	相关系数	变化率	相关系数	变化率	相关系数
T/[℃·(10a)$^{-1}$]	上游	0.29**	0.52	0.38**	0.38	0.23**	0.52
	中游	0.25**	0.68	0.32**	0.52	0.20**	0.55
	下游	0.24**	0.69	0.29**	0.52	0.20**	0.60
	全流域	0.26**	0.70	0.33**	0.56	0.21**	0.60
P/[mm·(10a)$^{-1}$]	上游	5.52**	0.35	0.29	0.05	5.23**	0.35
	中游	5.19	0.25	0.88	0.16	4.31	0.22
	下游	6.11*	0.31	0.63	0.19	5.48*	0.30
	全流域	5.61**	0.39	0.60	0.16	5.01**	0.38
Rh/[(%·(10a)$^{-1}$]	上游	0.51	0.23	0.42	0.10	0.57**	0.33
	中游	-0.63*	0.30	-1.24**	0.42	-0.19	0.08
	下游	-0.35	0.22	-0.25	0.11	-0.43	0.25
	全流域	-0.16	0.11	-0.36	0.16	-0.02	0.01
V/[(m·s^{-1}·(10a)$^{-1}$]	上游	0.003	0.02	-0.02	0.13	0.02	0.11
	中游	-0.14**	0.69	-0.10**	0.61	-0.18**	0.70
	下游	-0.05*	0.30	-0.02	0.15	-0.08**	0.35
	全流域	-0.06**	0.53	-0.05**	0.42	-0.08**	0.54
大风日数/[(d·(10a)$^{-1}$]	上游	1.43	0.16	0.09	0.03	1.33	0.19
	中游	-1.84**	0.57	-0.10**	0.34	-1.73**	0.56
	下游	-0.50	0.25	-0.09	0.20	-0.41	0.23
	全流域	-0.30	0.10	-0.03	0.03	-0.27	0.12

注:T 表示气温;P 表示降水量;Rh 表示相对湿度;V 表示平均风速;* 通过 95% 置信度检验;** 通过 99% 置信度检验。

8 次,可以看出 90 年代后,少雨期的次数明显减少,多雨期的次数明显增加。线性趋势结果显示,4 个单元年降水量呈增加趋势,变化倾向率 5.19 ~6.11 mm·(10a)$^{-1}$。经相关系数检验,下游区域增长趋势通过了 95% 置信度检验、中游区域未通过检验、上游和全流域通过了 99% 置信度检验(表 1)。干、湿季降水量变化(图略)亦表现出增加趋势。其中,干季降水量增加 0.29 ~0.88 mm·(10a)$^{-1}$,湿季降水量增加幅度占全年降水量的 83.12% ~94.78%,为 4.31 ~5.48 mm·(10a)$^{-1}$(表 1)。

(3) 相对湿度:近 60 a 叶尔羌河流域 4 个单元平均相对湿度分别为 47.54%、41.37%、53.54% 和 47.71%。除上游区域,年相对湿度变化呈减小趋势,且中游地区减小幅度最大($P<0.05$),其他区域均未通过检验(表 1)。干、湿季相对湿度的变化趋势与年变化一致,上游湿季相对湿度每 10 a 增加 0.57%($P<0.01$),干季增加趋势未通过检验。中、下游和全流域干季相对湿度每 10 a 减少 0.25% ~1.24%,其中,中游区域减小幅度最大($P<0.01$);湿季每 10 a 减小 0.02% ~0.43%,均未通过显著性检验(表 1)。

(4) 平均风速:近 60 a 叶尔羌河流域 4 个单元多年平均风速分别为 1.60、1.92、1.32、1.57 m·s^{-1}。线性趋势分析表明,除上游区域表现为增加趋势外,其他区域均表现为减小趋势,每 10 a 减小 0.05 ~0.14 m·s^{-1}。湿季变化规律与年变化一致,上游表现出不显著的增加趋势,其他区域表现为减小趋势,每 10 a 减小 0.08 ~0.20 m·s^{-1}($P<0.01$);干季均表现为减小趋势,每 10 a 减小 0.02 ~0.10 m·s^{-1},除上、下游区域未通过检验外,其他区域通过 99% 置信度检验。4 个单元多年平均大风日数分别为 16、36、7、5 d,年、干、湿季大风日数变化趋势与平均风速一致,除上游区域呈增加趋势外,其他区域大风日数呈减小趋势,且中游地区减小趋势最明显(表 1)。年内大风日数分布不均,4 个单元湿季大风日数占全年大风日数的 77.18% ~96.88%。

3.1.2 突变分析 综合运用 M-K、累积距平、信噪比法确定 4 个单元近 60 a 及干湿季气候要素的突变年份,其中 M-K 法确定的突变点均通过 95% 置信度检验。检测结果(表 2)表明:

(1) 平均气温:4 个单元平均气温均在 1996 年发生了由低温向高温的突变,突变后 1997—2015 年的平均气温较突变前 1957—1996 年的平均气温升高了 0.85 ~1.09 ℃。除上游区域外,干季气温突变年份集中在 1986 年附近,早于湿季,表明干季气温对全球气候变化的响应更敏感[15]。

(2) 降水量:M-K 突变检验显示,4 个单元在置信度线内虽有交点,但突变区域未通过 95% 置信度检验;通过累积距平法检测出的突变点也未达到信噪比法检验的要求。表明 4 个单元降水量在全年、干季、湿季未出现明显突变点。但是 4 个单元干季降水量在近 5 a 出现了减小趋势,这是否与相对湿度的突变有关,还需进一步研究。

(3) 相对湿度:4 个单元年相对湿度在 2004—

表 2 气候要素突变年

Tab.2 The mutated years of climatic factors

区域	时间尺度	*T*		*P*		*Rh*		*V*	
		M-K	累积距平	M-K	累积距平	M-K	累积距平	M-K	累积距平
全流域	年	1995	1996*	1992,2000	1986	1966,1977,1982	2006*	1982*	1985*
	干季	1988	1986	1973,1977,1989,2002	1989	1966,1972,1983,1996	2008	1974	1981*
	湿季	1997	1996	1993,2000	1986	1979,2009	2005*	1985*	1987*
上游	年	1994	1996	2004	1997	1992,1996	1985	1980*,2003	1981*,1997*
	干季	1987,1994	1996	1984,2004	2002	1987,1995,2000	1981	1966,1976	1981*
	湿季	1994	1993	2005	1997	1993*	1990	1971*,1980*,2000*	1999*
中游	年	1998*	1996*	1973,1992,2002	1986	1960,2014	2004*	1980*	1984*
	干季	1988	1986	1986,2000	1989	1998,2006	1993	1979*	1984
	湿季	2004*	1996	1973,1994,2002	1986	1966,2013	2004*	1979*	1983*
下游	年	1987	1996*	1986	1986	1973,2008	2006*	1964,1993*	1993*
	干季	1987	1985	1989*,1998	1989*	1967,1995,2014	1967	1960,1988	1993*
	湿季	1995	1996	1986,1999	1980	1974,1988,2006*,2012	2003*	1964,1975*,1993*	1994*

注:* 通过信噪比法检验。

表3 卡群站各年代径流量

Tab.3 Runoff volumes at Kaqung Hydrological Station in different decades

	1957—1960 年	1961—1970 年	1971—1980 年	1981—1990 年	1991—2000 年	2001—2015 年	1957—2015 年
径流量/10^8 m^3	63.97	62.80	66.02	65.24	68.04	72.44	67.18
距平值/10^8 m^3	-3.21	-4.38	-1.16	-1.94	0.86	5.26	0

2006 年发生了由增加向减少的突变,突变后相对湿度的减小幅度为 2.92% ~6.61%,其中湿季突变情况较干季更明显。

(4) 平均风速:近 60 a 叶尔羌河流域及上、中游区域年、干季、湿季平均风速在 1983 年附近发生了由增大向减小的突变,下游区域突变出现在 1993 年,表明西部地区平均风速变化较东部更敏感[21]。同时上游地区还检测出在 1999 年附近年、湿季平均风速发生了由减小向增大的突变,突变后平均风速增大 0.20 ~0.26 $m \cdot s^{-1}$。

3.2 径流变化特征

3.2.1 趋势分析 1957—2015 年叶尔羌河流域径流多年平均值为 67.18 × 10^8 m^3,最大径流量出现在 2012 年,为 95.63 × 10^8 m^3,最小径流量出现在 1965 年,为 44.68 × 10^8 m^3。前 30 a(1957—1986 年)有 10 a 径流量超过均值,后 30 a(1986—2015 年)有 17 a 径流量超过均值。结合公式(3)发现,前 30 a 出现丰水期 2 次(1961,1973 年)、枯水期 4 次(1957,1964,1965,1972 年);后 30 a 出现丰水期 5 次(1994,2005,2006,2012,2013 年)、枯水期 4 次(1987,1989,1993,2009 年),这表明近 60 a 叶尔羌河流域径流量呈现增加趋势,增加了 2.03 × 10^8 $m^3 \cdot (10a)^{-1}$ ($P < 0.05$)。径流量年代际变化亦呈增加趋势,20 世纪 60 年代至 21 世纪初的 50 多年间径流量增加了 9.64 × 10^8 m^3,90 年代至 21 世纪初的贡献率最大,为 45.8% (表 3)。

3.2.2 突变分析 运用 M-K 突变检验法,对近 60 a 径流量数据进行突变分析,结果表明,叶尔羌河流域径流突变年份开始于 20 世纪 90 年代前期(图 4)。为减少错误发生,结合累积距平(图 5)同步分析,结果显示:近 60 a 径流量变化可分为 3 个阶段:1957—1961 年增加阶段,增长倾向率为 51.79 × 10^8 $m^3 \cdot (10a)^{-1}$ ($P < 0.01$);1961—1993 年减少阶段,减少倾向率为 24.33 × 10^8 $m^3 \cdot (10a)^{-1}$ ($P < 0.01$);1993—2015 年增加阶段,增长倾向率为45.63 × 10^8 $m^3 \cdot (10a)^{-1}$ ($P < 0.01$),其中 1993 年径流量累积距平绝对值最大,可确定研究区径流量在 1993年发生了突变,突变后多年平均径流量(1994—2015 年)较突变前(1957—1993 年)增加了 9.08 × 10^8 m^3。

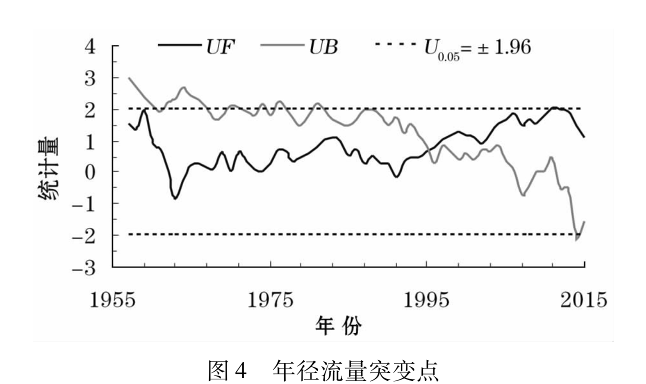


图 4 年径流量突变点

Fig.4 The abrupt change of annual runoff volume

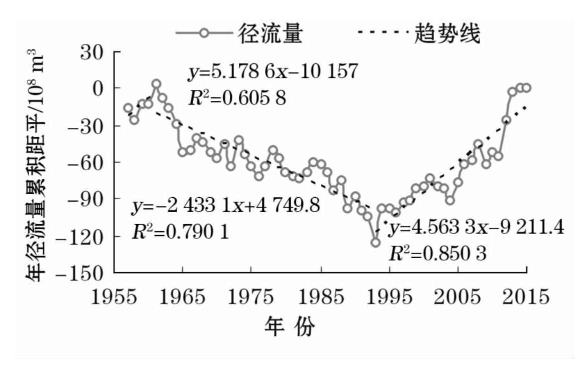


图 5 年径流量累积距平

Fig.5 The accumulative anomaly of annual runoff volume

3.3 径流量对气候变化的响应

3.3.1 相关性分析 选取卡群站 1957—2015 年年径流量数据与同时期上、中、下游的干、湿季气候数据做相关性分析(表 4)发现,研究区径流量与湿季平均气温、平均最低(最高)气温呈极显著正相关,与相对湿度呈负相关。除上游区域干季外,径流量与降水量和平均风速呈负相关;除中游区域干季外,径流量与大风日数呈负相关。这表明区域径流量的大小主要由湿季气温决定,不同区域的径流对干、湿季气候变化的响应程度存在差异。

(1) 上游:在干季,除相对湿度、大风日数外,径流量与其他要素呈正相关,主要受降水量、平均最低气温的影响;在湿季,径流量与平均气温、平均最低(最高)气温呈正相关,与其他要素呈负相关,这主要受平均最低气温和平均气温影响。

表 4　径流量与气候要素间的相关系数

Tab. 4　The correlation coefficients between runoff volume and climatic factors

区域	平均气温		平均最低气温		平均最高气温		降水量		相对湿度		平均风速		大风日数	
	干季	湿季	干季	湿季	干季	湿季	干季	湿季	干季	湿季	干季	湿季	干季	湿季
上游	0.08	0.58 **	0.09	0.59 **	0.07	0.57 **	0.17	-0.03	-0.02	-0.08	0.05	-0.02	-0.08	-0.20
中游	0.05	0.48 **	0.04	0.48 **	0.07	0.42 **	-0.04	-0.19	-0.27 *	-0.15	-0.18	-0.28 *	0.02	-0.25
下游	-0.001	0.42 **	0.03	0.27 **	-0.03	0.34 **	-0.01	-0.09	-0.09	-0.09	-0.27 **	-0.19	-0.20	-0.12

注:* 通过 95% 置信度检验,* * 通过 99% 置信度检验。

(2) 中游:径流量与干、湿季的平均气温和平均最低(最高)气温呈正相关,除干季大风日数,径流量与其他干、湿季要素呈负相关。干季主要受相对湿度和平均风速的影响,湿季主要受平均气温、平均最低(最高)气温和平均风速的影响。

(3) 下游:干季径流量除与平均最低气温呈正相关外,与其他要素呈负相关,且与平均风速呈显著负相关;湿季径流量与各要素的相关性与上、中游一致,即除平均气温、平均最低(最高)气温,与其他要素呈负相关外,主要受平均气温和平均最高气温的影响。

3.3.2　敏感性分析　径流对气候变化的敏感性是指径流对指定的气候变化情景的响应程度[13]。一般气候变化情景模式由假定的降水量变化和气温的变化叠加而成。水资源对气候变化的响应不仅受自然气候要素的影响,很大程度上也受制于人类活动。因此,响应过程很复杂,但是通过构建模型近似模拟径流量对气候变化的响应仍不失为一种可行的方法[12]。

(1) 模型构建:考虑到水资源系统与气候变化间的非线性关系,并参照蓝永超等[13]、周俊菊等[22]的相关研究,采用幂函数连乘的形式表示径流量与流域年降水量、年均温之间的定量关系。

$$R = e^{k} \times P^{\alpha} \times T^{\beta} \qquad (4)$$

式中:R、P、T 分别为流域年径流量、年降水量、年平均气温;k、α、β 分别为回归系数。

采用最小二乘法,求得回归系数 k、α、β 依次为 2.41、-0.08、0.95。模型的决定系数 $R^2 = 0.16$,相关系数 $r = 0.40 > r_{0.01} = 0.33$,通过 99% 显著性水平检验。故拟合模型为

$$R = e^{2.413} \times P^{-0.082} \times T^{0.952} \qquad (5)$$

(2) 气候变化情景:根据 AR4 以及秦大河等[1,7]对全球、国内气候变化情况的评估,结合叶尔羌河流域气候变化趋势以及蓝永超等[13]对开都河流域气候变化情景的预设,假定叶尔羌河流域年均气温和降水量在多年均值(1981—2010 年)的基础上,未来可能出现的气候变化情景方案分别为:气温变化 0、0.1、0.5、1.0 ℃和 1.5 ℃,降水量变化 0、±1%、±5%、±10%,共计 35 种变化情景。

(3) 敏感性分析:根据假定的气候变化情景,利用公式(5)计算不同情景下径流量的敏感程度。从表 5 中看出,当降水量、平均气温不变时,径流量减少 0.90%,这是由模型自身引起的误差。由于误差较小,一定程度上也反映了该模型具有较高的精度,可以用于敏感性分析。当平均气温不变,降水量增加或减少 1%、10% 时,径流量分别减少 0.98%、1.67% 和 0.82%、0.04%;当降水量不变,平均气温上升 0.1、1.0 ℃时,径流量增加 0.14%、9.06%,可以看出研究区径流量与降水量呈负相关,与气温呈正相关,且对气温变化更敏感,这与研究区的实情一

表 5　径流量(Δ*R*)对气候变化响应的敏感性分析

Tab. 5　Sensitivity analysis of response of runoff volume to climate change

		Δ*P*/%						
		-10%	-5%	-1%	0	1%	5%	10%
Δ*T*/℃	0	-0.04	-0.49	-0.82	-0.90	-0.98	-1.30	-1.67
	0.1	1.00	0.56	0.22	0.14	0.05	-0.26	-0.64
	0.5	5.03	4.57	4.21	4.13	4.04	3.71	3.32
	1.0	10.00	9.52	9.15	9.06	8.97	8.62	8.21
	1.5	15.10	14.59	14.20	14.11	14.01	13.65	13.22

注:Δ*T* 表示气温变化量;Δ*P* 表示降水量变化量;Δ*R* 表示径流量变化量。

致。叶尔羌河属于典型的雪冰补给型河流，77.4%的径流量来自雪冰融水补给，当降水量增多时，持续降低的气温减少了对冰川积雪的融化，这时因降水量增多带来的径流增加量远无法弥补因气温降低引起径流的减少量，此时径流量反而减小[16,18]。

4 结论与讨论

（1）近 60 a 叶尔羌河流域气候变化呈现暖湿化趋势，4 个单元平均气温每 10 a 上升 0.24～0.29 ℃，平均最低气温增幅高于最高气温，降水量增加速率 5.19～6.11 mm·(10a)$^{-1}$，除上游区域外，相对湿度、平均风速和大风日数均呈递减趋势。流域径流量呈增加趋势，变化倾向率为 2.03×10^8 m^3·(10a)$^{-1}$。

（2）近 60 a 叶尔羌河流域气温于 1996 年发生向高温的突变；降水量突变不明显；相对湿度、平均风速分别于 21 世纪初、1983 年发生由大向小的突变；径流量于 1993 年发生由减小向增大的突变。本文径流突变时间和凌红波等[16]研究结果一致，但降水量突变时间存在差异。这主要是因为本文降水量数据来源于塔什库尔干、莎车和巴楚站的均值，凌红波等[16]研究采用的是卡群站提供的降水量数据，数值序列本身可能存在差异。其次，本文和凌红波等[16]采用的数据时间序列不一致。符淙斌等[23]研究指出，离开样本序列长度谈突变问题是不确切的。再次，确定突变的方法不一致。本文运用 M-K、累积距平、信噪比 3 种检验方法综合确定突变时间，可以看出通过 M-K 突变检验法确定的突变点不一定通过信噪比法的检验，为了提高准确性，应同时配合多种方法[23]。

（3）相关性分析显示，叶尔羌河流域径流量与湿季平均气温、平均最低（最高）气温呈极显著正相关，与相对湿度呈负相关，除上游区域干季外，与降水量和平均风速亦呈负相关，除中游干季外，径流量与大风日数呈负相关。可以看出，上游径流与干季降水量呈正相关，与湿季降水量呈负相关，其他区域与干湿季降水量均呈负相关，这表明河川径流的变化是一个复杂的过程，不仅受气候变化的影响，还受制于人类活动和下垫面的影响[14,24-25]。由于上游区域位于山区，人类活动较少，径流变化更多受气候影响。干季降水量的增加直接补充了雪冰储量，而湿季时因降水量增多带来的径流增加量无法弥补因气温降低减少的径流量，所以，上游径流量与湿季降水量呈负相关，与干季降水量呈正相关[16,18]。

（4）敏感性分析显示，当降水量不变，气温升高 1 ℃，径流量增加 9.06%；当气温不变，降水量增加 10%，径流量减少 1.67%，表明研究区径流量与降水量呈负相关，与气温呈正相关，且对气温的敏感性强于降水。这与新疆诸多流域如乌鲁木齐河[13-14]、开都河[13]、博尔塔拉河[10]情况不一致，但与之前学者的研究结论一致[17,24]。迪丽努尔·阿吉等[10]在研究博尔塔拉河流域径流量与气温、降水的敏感性关系时发现，当降水量不变，气温升高 1 ℃，径流量增加 4.1%；当气温不变，降水量增加 10%，径流量增加 4.6%，可以看出博尔塔拉河径流量与气温、降水量呈正相关，且对降水的响应程度更强。这与研究区情况相反，可能与流域地形及径流组成有关。博尔塔拉河流域南、北、西三面环山，中间为谷地平原，地势西高东低，年降水量 90～500 mm，仅次于新疆阿勒泰、伊犁地区，是博尔塔拉河径流量的主要补给来源[26]。叶尔羌河流域受山脉、沙漠的影响，无论是南下的冷空气还是北上的暖湿气流，在此都变得暖、干，常年降水量不足 70 mm，流域 77.4% 径流量来自雪冰融水。同时，冰川面积和热量差异也决定了叶尔羌河流域径流量对气温的响应程度更强烈。叶尔羌河流域山区拥有冰川总面积 5 315 km^2，博尔塔拉河流域山区仅为 581.7 km^2；博尔塔拉河流域中下游年均气温为 5.0～6.0 ℃[26]，叶尔羌河流域中下游年均气温高达 12.0～12.4 ℃，优势的热量条件更有利于雪冰等“固体水库”的融化，使径流量增加。综上所述，叶尔羌河流域径流量对气温变化的敏感性强于降水。

参考文献(References)：

〔1〕 秦大河，罗勇，陈振林，等. 气候变化科学的最新进展：IPCC 第四次评估综合报告解析〔J〕. 气候变化研究进展，2007，3(6)：311－314.〔Qin Dahe，Luo Yong，Chen Zhenlin，et al. Latest advances in climate change sciences：Interpretation of the synthesis report of the IPCC fourth assessment report〔J〕. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis，2007，3(6)：311－314.〕

〔2〕 任国玉，郭军，徐铭志，等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征〔J〕. 气象学报，2005，63(6)：942－956.〔Ren Gioyu，Guo Jun，Xu Mingzhi，et al. Climate changes of China's mainland over the past half century〔J〕. Acta Meteorologica Sinica，2005，63(6)：942－956.〕

〔3〕 徐贵青，魏文寿. 新疆气候变化及其对生态环境的影响〔J〕. 干旱区地理，2004，27(1)：14－18.〔Xu Guiqing，Wei Wenshou.

Climate change of Xinjiang and its impact on eco-enviromen〔J〕. Arid Land Geography,2004,27(1):14 - 18.〕
〔4〕 陈亚宁,李稚,方功焕,等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究〔J〕. 地理学报,2017,72(1):18 - 26.〔Chen Yaning,Li Zhi,Fang Gonghuan,et al. Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountians,Central Asia〔J〕. Acta Geographic Sinica,2017,72(1):18 - 26.〕
〔5〕 李峰平,章光新,董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述〔J〕. 地理科学,2013,33(4):457 - 464.〔Li Fengping,Zhang Guangxin,Dong Liqin. Studies for impact of climate change on hydrology and water resources〔J〕. Scientia Geographica Sinica,2013,33(4):457 - 464.〕
〔6〕 任贾文,明镜. IPCC 第五次评估报告对冰冻圈变化的评估结果要点〔J〕. 气候变化研究进展,2014,10(1):25 - 28.〔Ren Jiawen,Ming Jing. IPCC fifth assessment report evaluation results of frost ring changes〔J〕. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis,2014,10(1):25 - 28.〕
〔7〕 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展〔J〕. 地理科学进展,2014,33(7):874 - 883.〔Qin Dahe. Science of climate change and sustainable development of human beings〔J〕. Progress in Geography,2014,33(7):874 - 883.〕
〔8〕 商沙沙,廉丽姝,马婷,等. 近 54 a 中国西北地区来气温和降水的时空变化特征〔J〕. 干旱区研究,2018,35(1):68 - 76.〔Shang Shasha,Lian Lishu,Ma Ting,et al. The temporal and spatial characteristics of temperature and precipitation in Northwestern China in recent 54 years〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(1):68 - 76.〕
〔9〕 禹朴家,徐海量,张青青,等. 1959—2007 年玛纳斯河流域干湿季气候变化趋势〔J〕. 冰川冻土,2010,32(6):1 121 - 1 129.〔Yu Pujia,Xu Hailiang,Zhang Qingqiing,et al. Climate changing trend in wet and dry seasons in the Manas River Basin in 1959 - 2007〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology,2010,32(6):1 121 - 1 129.〕
〔10〕 迪丽努尔·阿吉,近藤昭彦,肖开提·阿吉,等. 博河流域气候变化及其与径流量的关系研究〔J〕. 资源科学,2014,36(10):2 123 - 2 130.〔Dilinuer Aji,Kondoh A K H K,Xiaokaiti Aji,et al. Climatic change in the Bortala River Basin and runoff volume〔J〕. Resources Science,2014,36(10):2 123 - 2 130.〕
〔11〕 陈亚宁,徐长春,郝兴明,等. 新疆塔里木河流域近 50 a 气候变化及其对径流的影响〔J〕. 冰川冻土,2008,30(6):921 - 929.〔Chen Yaning,Xu Changchun,Hao Xingming,et al. Climatic change and its impact on runoff in the Tarim River Basin of Xinjiang province in recent 50 years〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology,2008,30(6):921 - 929.〕
〔12〕 陈玲飞,王红亚. 中国小流域径流对气候变化的敏感性分析〔J〕. 资源科学,2004,26(6):62 - 68.〔Chen Lingfei,Wang Hongya. Sensitivity of runoff to climate change in small drainage basins in China〔J〕. Resources Science,2004,26(6):62 - 68.〕
〔13〕 蓝永超,钟英君,吴素芬,等. 天山南、北坡典型河流出山径流对气候变化响应的分析对比〔J〕. 中国沙漠,2011,31(1):254 - 260.〔Lan Yongchao,Zhong Yingjun,Wu Sufen,et al. Response of mountain runoff to climate change in representative rivers originated from the Tianshan Mountain〔J〕. Journal of Desert Research,2011,31(1):254 - 260.〕
〔14〕 穆艾塔尔·赛地,丁建丽,阿不都·沙拉木,等. 天山北坡山区流域融雪径流模拟研究〔J〕. 干旱区研究,2016,33(3):636 - 642.〔Muattar Saydi,Ding Jianli,Abudu Shalamu,et al. Simulation of snowmelt runoff in the catchments on Northern slope of the Tianshan Mountains〔J〕. Arid Zone Research,2016,33(3):636 - 642.〕
〔15〕 孙本国,毛伟峄,冯燕茹,等. 叶尔羌河流域气温、降水及径流变化特征分析〔J〕. 干旱区研究,2006,23(2):205 - 209.〔Sun Benguo,Mao Weiyi,Feng Yanru,et al. Analysis of variation characteristics of temperature,precipitation and runoff in Yarkant River Basin〔J〕. Arid Zone Research,2006,23(2):205 - 209.〕
〔16〕 凌红波,徐海量,张青青,等. 叶尔羌河年径流量与降水量的集中性及相关性分析〔J〕. 中国沙漠,2012,32(6):1 757 - 1 764.〔Ling Hongbo,Xu Hailiang,Zhang Qingqing,et al. Analysis on concentration and correlation of runoff and precipitation in the Yarkand River Basin〔J〕. Journal of Desert Research,2012,32(6):1 757 - 1 764.〕
〔17〕 刘天龙,杨青,秦榕,等. 新疆叶尔羌河源流区气候暖湿化与径流的响应研究〔J〕. 干旱区资源与环境,2008,22(9):49 - 53.〔Liu Tianlong,Yang Qing,Qin Rong,et al. Climate change towards warming-wetting trend and its effects on runoff at the headwater region of the Yarkant River in Xinjiang〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2008,22(9):49 - 53.〕
〔18〕 陈昱凝,胡林金,颜伟,等. 叶尔羌河上游不同流域夏季气候和径流变化研究〔J〕. 冰川冻土,2014,36(3):678 - 684.〔Chen Yuning,Hu Linjin,Yan Wei,et al. Study of the changes in summer climate and runoff in two upper streams of the Yarkant River〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology,2014,36(3):678 - 684.〕
〔19〕 张雪琪,满苏尔·沙比提,马国飞. 叶尔羌河平原绿洲气候变化对粮食生产的影响〔J〕. 干旱区研究,2018,35(3):705 - 712.〔Zhang Xueqi,Mansur Shabiti,Ma Guofei. Effects of climate change on grain production in plain oasis in the Yarkant river basin〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(3):705 - 712.〕
〔20〕 穆兴民,李靖,王飞,等. 黄河天然径流量年际变化过程分析〔J〕. 干旱区资源与环境,2003,17(2):1 - 5.〔Mu Xingming,Li Jin,Wang Fei,et al. Analysis on the annual natural runoff variety process of the Yellow River〔J〕. Journal of Arid Land of Resources and Environment,2003,17(2):1 - 5.〕
〔21〕 张克新,潘少明,曹立国. 1961—2010 年河西地区平均风速时空变化趋势分析〔J〕. 地理科学,2014,34(11):1 404 - 1 408.〔Zhang Kexin,Pan Shaoming,Cao Liguo. Spatial and temporal trends of average wind speed in Hexi area in 1961 - 2010〔J〕. Scientia Geographica Sinica,2014,34(11):1 404 - 1 408.〕
〔22〕 周俊菊,雷莉,石培基,等. 石羊河流域河川径流对气候与土地利用变化的响应〔J〕. 生态学报,2015,35(11):3 788 - 3 796.〔Zhou Junju,Lei Li,Shi Peiji,et al. Response of runoff to the climate and land use pattern changes in Shiyang River Basin〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2015,35(11):3 788 - 3 796.〕
〔23〕 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法〔J〕. 大气科学,1992,16(4):482 - 492.〔Fu Congbin,Wang Qiang. The definition and detection of the abrupt climatic change〔J〕. Scientia Atmospherica Sinica,1992,16(4):482 - 492.〕

〔24〕陈忠升. 中国西北干旱区河川径流变化及归因定量辨识〔D〕. 上海:华东师范大学,2016.〔Chen Zhongsheng. Quantitative Identification of River Runoff Change and Its Attribution in the Arid Region of Northwest China〔D〕. Shanghai:East China Normal University,2016.〕

〔25〕任国玉,袁玉江,柳艳菊,等. 我国西北干燥区降水变化规律〔J〕. 干旱区研究,2016,33(1):1－19.〔Ren Guoyu,Yuan Yujiang,Liu Yanju,et al. Changes in precipitation over Northwest China〔J〕. Arid Zone Research,2016,33(1):1－19.〕

〔26〕古丽吉米丽・艾尼. 近50 a博尔塔拉河流域气候变化对径流量的影响研究〔D〕. 乌鲁木齐:新疆师范大学,2012.〔Dilijimili Aini. Climate Change in Xinjiang Bortala River Basin and Its Effects on Runoff Bortala River in Recent 50 Years〔D〕. Urumqi:Xinjiang Normal University,2012.〕

Response of Runoff Volume to Climate Change in the Yarkant River Basin during the Period of 1957－2015

ZHANG Xue-qi[1], Mansur Shabit[1], LIU Hai-tao[2], MA Guo-fei[1]

(1. *School of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi* 830054, *Xinjiang, China*;
2. *Meteorological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Regions, Urumqi* 830002, *Xinjiang, China*)

Abstract: The characteristics of the dry and wet climate changes in different regions were analyzed using the linear trend, correlation analysis, cumulative anomaly and the Mann-kendall (M-K) mutation test based on the long-term observation data from the meteorological and hydrological stations in the Yarkant River Basin. Moreover, the different climate scenario combinations were assumed to analyze the response degree of runoff volume to climate change. The results showed that: ① Both the temperature and precipitation in the 4 units were in an increase trend; in addition to the upper reaches, the relative humidity, average wind speed and wind days in the drainage basin were in a decrease trend, but the runoff volume was in an increase trend; ② The mutations of temperature and relative humidity occurred in 1996 and 2005 respectively, but there was no obvious mutation of precipitation; the mutation of mean wind speed in the drainage basin occurred in 1983 except in the lower reaches, and the runoff volume was sharply increased by 9.08×10^8 m^3 in 1993; ③ The correlation analysis showed that the runoff volume was positively correlated with the mean air temperature and the minimum (maximum) air temperature in wet season, and negatively correlated with the average wind speed, gale days and the relative humidity in wet season. In addition to the runoff volume was positively correlated with the dry season precipitation in the upper reaches, it was negatively correlated with precipitation in other areas; ④ Sensitivity analysis showed that, when precipitation was constant and the temperature increased by 1 ℃, the runoff volume was increased by 9.06%; when the temperature did not change and the precipitation increased by 10%, the runoff volume was decreased by 1.67%, which was mainly related to the runoff composition. The 77.4% runoff was recharged by ice-snow melt water. With the increase of precipitation, the temperature was decreased, and the melting of glacier and snow was reduced. At this time, the increase of precipitation could not make up for the recharge decrease of ice-snow melt water, so the runoff volume was positively correlated with temperature but negatively correlated with precipitation, and it was more sensitive to temperature change.

Key words: climate change; air temperature; precipitation; runoff volume; sensitivity; Yarkant River Basin